شبیه‌سازی رایانه‌ای فرآیند ولکانش به‌منظور محاسبهٔ زمان پخت در یک قطعهٔ لاستیکی با اصلاح معادلهٔ سینیتک پخت★

محمدرضا عرفانیان[۱]　　سید محمد جوادی[۲]　　محمد مقیمان[۳]

چکیده *در این مقاله از روش حل عددی برای شبیه‌سازی فرآیند پخت لاستیک و محاسبهٔ زمان پخت یک قطعهٔ لاستیکی تولید شده به‌روش قالب‌گیری تزریقی استفاده شده است. مهم‌ترین نوآوری کار حاضر محاسبهٔ زمان پخت با اصلاح مدل سینیتیک پخت است. معادلات سینیتیک در یک کد جانبی گنجانده شده و با افزودن آن به نرم‌افزار فلوئنت، امکان شبیه‌سازی عددی فرآیند پخت در یک قطعهٔ لاستیکی، فراهم گردیده است. خواص سینیتیکی آمیزه، ظرفیت گرمایی ویژه و لزجت لاستیک از آزمایش به‌دست می‌آیند. به‌منظور محاسبهٔ زمان پخت به‌روش تجربی از نتایج تست استحکام استفاده شده است. زمان پرشدن قالب و زمان پخت حاصل از حل عددی، سازگاری خوبی با زمان پخت حاصل از نتایج آزمایشگاهی دارند.*

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی عددی، ولکانش، قالب‌گیری تزریقی، زمان پخت.

Simulation of Rubber Vulcanization for Calculation of the Curing Time with Modification of the Kinetic Model

M.R. Erfanian　　S. M. Javadi　　M. Moghiman

Abstract *The present work is focused on the computational method for simulation of the rubber vulcanization process in injection molding machines. The main innovation of the work is the calculation of the curing time in a rubbery part using the modification of curing kinetic model. For solving the curing equations, the computer code is developed in "UDF" module of the Fluent. The parameters of curing model, specific heat and viscosity of the rubber are obtained from the experiment. In order to evaluate the experimental curing time, a mechanical compression test is performed on the rubbery part at different times. Predicted mold filling and curing times are compared with experimental data, which confirmed the accuracy and applicability of the method.*

Key Words Numerical Simulation, Vulcanization, Injection Molding, Curing Time.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۳/٤/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۰/۷ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد. Mohammad.Erfanian09@gmail.com

(۲) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین، قوچان.

(۳) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

لاستیک‌ها به‌دلیل خواص منحصر به فرد، کاربرد فراوانی در صنعت یافته‌اند. لاستیک‌ها بر خلاف بیشتر مواد مهندسی، هم خواص استحکامی بالایی دارند و هم از خواص تغییر شکل مناسب برخوردارند. لاستیک‌ها غیر قابل تراکم‌اند و مدول حجمی آن‌ها معمولاً هزار برابر بزرگ‌تر از مدول یانگ می‌باشد [1]. علاوه بر این لاستیک ها نسبت به نفوذ مایعات و گازها مقاومت نشان می‌دهند. تمامی این ویژگی‌ها ارزش‌های قابل‌توجهی برای استفاده از لاستیک‌ها در صنایع خودرو سازی به‌شمار می‌آید [1].

فرآیند قالب‌گیری تزریقی الاستومرها به‌منظور تولید انبوه، یکی از مهم‌ترین فرآیندهای ساخت می‌باشد [2]. امروزه این فرآیند پرکاربردترین شیوهٔ تولید قطعات لاستیکی در صنایع خودروسازی است. در این روش به لاستیک حرارت داده می‌شود تا بتواند درون حفره‌های قالب جاری شود. سپس این ماده تحت فشار قرار می‌گیرد و به درون یک قالب داغ بسته تزریق می‌شود تا همهٔ حفره قالب را پر کند و شکل مورد نظر را به خود بگیرد. پس از طی زمان مشخص و دست‌یابی به پخت بهینه، قطعه از قالب خارج می‌شود [3]. از آن‌جایی که گرمایش ناقص یا بیش از حد لاستیک سبب کاهش خواص مکانیکی آن می‌گردد، بنابراین یافتن زمان پخت بهینه در قطعات لاستیکی اهمیت فراوانی دارد [4].

در حال حاضر نحوهٔ دست‌یابی به زمان پخت بهینه، مبتنی بر تجربه و روش پر هزینهٔ سعی و خطا می‌باشد [3]. آزمایش‌های گوناگونی در زمان‌های مختلف از شروع قالب‌گیری انجام می‌شود تا زمان پخت قطعهٔ لاستیکی مشخص گردد. بنابراین استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای به‌منظور یافتن زمان دست‌یابی به پخت بهینه بسیار مناسب خواهد بود.

در سال‌های اخیر مطالعهٔ عددی فرآیند ولکانش موضوع مورد علاقهٔ محققان بسیاری بوده است. در اکثر پژوهش‌های انجام گرفته، فرآیند ولکانش در قطعات لاستیکی بررسی شده است که به شیوهٔ قالب‌گیری فشاری تولید شده‌اند. در شرایطی که امروزه اکثر قطعات پیچیدهٔ خودرو به‌روش قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شوند [2].

قریشی و نادری [5] در سال ۲۰۰۵ با توسعهٔ یک برنامهٔ کامپیوتری، فرآیند پخت در یک نمونهٔ ساده را بررسی کردند. آنها در این پژوهش از مدل سینیتیک پخت کمال- سرور برای نشان دادن رفتار پخت لاستیک استفاده نمودند که این مدل نتایج بسیار مناسبی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه داد. آریلاجا و همکارانش [6] در سال ۲۰۰۷ فرآیند پخت را در تولید قطعات به شیوهٔ قالب‌گیری تزریقی در یک مدل بسیار ساده و با ضخامت یکنواخت مطالعه نمودند. آنها در شبیه‌سازی خود مدل لزجت غیرنیوتنی- توانی را به‌کار گرفتند و از ضرایب مدل لزجت پیش‌فرض موجود در نرم‌افزار مولد فلو که تنها برای نوع خاصی از لاستیک معرفی شده است، استفاده کردند. رافعی و همکارانش [7] در سال ۲۰۰۹ با ارائهٔ مدلی جدید برای سینیتیک پخت، فرآیند ولکانش را در یک قطعهٔ صنعتی که به روش قالب‌گیری فشاری تولید شده است، مورد مطالعه عددی و آزمایشگاهی قرار دادند. ابهیلاش و همکارانش [8] در سال ۲۰۰۹ با تلفیق معادلهٔ انرژی و مکانیزم شیمیایی پخت، به حل عددی فرآیند ولکانش در یک ورق باریک با استفاده از مدل ساز و کاری (Mechanistic kinetic model) پخت پرداختند. مدل‌های ساز و کاری بسیار پیچیده‌اند و قابلیت استفاده در برنامه‌های عددی را ندارند [9]. خور و همکارانش [10] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای، فرآیند قالب‌گیری تزریقی را بدون در نظر گرفتن مرحلهٔ پخت لاستیک بررسی کردند. رامورینو و همکارانش [3] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از حل عددی، فرآیند قالب‌گیری تزریقی و پخت آمیزهٔ لاستیک را مطالعه نمودند؛ اما آنها نیز از خواص پیش‌فرض

موجود در نرم‌افزار مولد فلو برای فرآیند ولکانش آمیزهٔ لاستیکی استفاده نمودند. در سال ۲۰۱۳ لروی و همکاران [11] با ارائه مدل پختی که توانایی مدل‌سازی زمان برگشت (Reversion) در پخت را داشت، نتایج پخت مربوط به یک مدل آزمایشگاهی را ارائه دادند. حسینی و رزاقی [12] در سال ۲۰۱٤، سینتیک پخت لاستیک را با هدف بررسی اثر مواد تشکیل دهندهٔ آمیزهٔ لاستیک مورد بررسی قرار دادند و اثر افزودن عوامل مختلف به ترکیب لاستیک را بر پخت آن ارزیابی نمودند [12].

در این پژوهش، ابتدا خواص مربوط به سینتیک پخت لاستیک با استفاده از نتایج آزمایش‌های رئومتری به‌دست می‌آید. هم‌چنین ضرایب موجود در مدل ویسکوزیته غیر نیوتنی- توانی توسط داده‌های آزمایش ویسکومتری برای آمیزهٔ لاستیکی مورد نظر محاسبه می‌گردد. سپس با اصلاح معادلهٔ سینتیک پخت، معادلات مربوط به فرآیند پخت در قالب یک برنامه رایانه‌ای کمکی و به زبان C توسعه می‌یابد و به نرم‌افزار فلوئنت افزوده می‌گردد. با اضافه کردن این برنامهٔ کمکی به نرم‌افزار فلوئنت، می‌توان در هر لحظه از زمان توزیع درجهٔ پخت قطعهٔ مورد نظر را به‌صورت میدانی پیوسته (مانند دما و فشار) مشاهده نمود. از حل هم‌زمان معادلات سینتیک پخت، جریان و انتقال حرارت، فرآیندهای پر شدن حفره (تزریق) و ولکانش شبیه‌سازی رایانه‌ای می‌شود و زمان رسیدن به پخت بهینه در قطعهٔ مورد نظر محاسبه می‌گردد. دقت نتایج عددی در پیش‌بینی زمان پخت قطعهٔ مورد نظر، با مقایسهٔ آن با زمان پخت حاصل از آزمایش سنجش استحکام (Stiffness) مشخص می‌گردد.

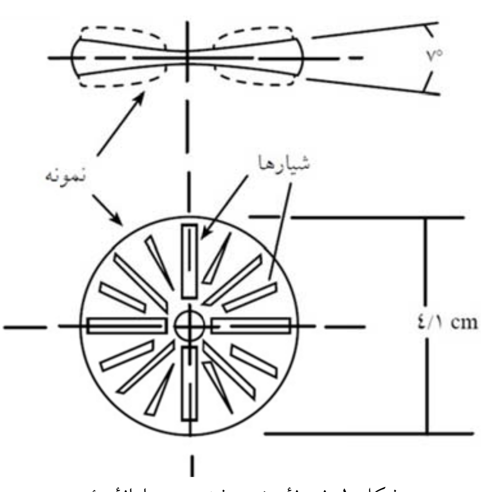
آزمایش‌ها

ترکیب آمیزه. در این پژوهش از یک آمیزه لاستیک تولید شرکت بسپار سازه از مجموعه کارخانه‌های گروه صنعتی پارت لاستیک استفاده گردیده است. این آمیزه که فرمول‌بندی ترکیبی معینی دارد، شامل ٪۶۰ NR، ٪۳۵ کربن سیاه و مواد نفتی و ٪۵ عامل پخت می‌باشد.

آزمایش رئومتری. آزمون رئومتری به‌وسیلهٔ MDR2000 ساخت شرکت آلفا تکنولوژی اکراین و بر طبق استاندارد ASTM D 2048 و حرکات نوسانی با زاویهٔ رفت و برگشت با دامنهٔ ۱ درجه در بسامد ۱/۷ HZ و و انحراف مجاز ۰/۰۳ انجام و تغییرات گشتاور برحسب زمان برای دماهای ۱۶۰، ۱۷۰ و ۱۸۰ درجه سلسیوس اندازه گیری شد. این آزمایش ۱۰ مرتبه انجام شد و تکرارپذیری آن تأیید گردید. مشخصات هندسی نمونهٔ آزمایشگاهی در شکل (۱) نشان داده شده است. منحنی‌های رئومتری گشتاور-زمان به‌کمک معادلهٔ (۱) به منحنی‌های درجه پخت-زمان تبدیل می‌گردد [13].

$$\alpha = \frac{\gamma_t - \gamma_0}{\gamma_\infty - \gamma_0} \quad (۱)$$

که در آن α درجهٔ پخت و مقداری بین صفر و یک است، γ_∞ گشتاور در پایان زمان پخت، γ_t گشتاور در زمان t و γ_0 گشتاور در شروع زمان پخت است.



شکل ۱ نمونهٔ پخت شده در سامانهٔ رئومتر

آزمون سنجش استحکام. از آزمون سنجش سختی برای محاسبهٔ استحکام سختی قطعات لاستیکی پیچیده در زمان‌های مختلف از شروع فرآیند پخت استفاده می‌شود. این آزمون، معیار محاسبهٔ زمان پخت در قطعات پیچیده با ضخامت غیریکنواخت است که امکان آزمایش رئومتری برای آنها وجود ندارد [3]. در زمان‌هایی از شروع فرآیند پخت که احتمال می‌رود قطعهٔ لاستیکی به‌طور کامل پخت شده است، قطعهٔ لاستیکی از قالب خارج می‌شود و استحکام آن محاسبه می‌شود. زمان متناظر با بالاترین استحکام اندازه‌گیری شده به‌عنوان زمان پخت قطعهٔ مورد نظر شناخته و ثبت می‌شود. برای سنجش استحکام از ماشین سنجش خستگی دینامیکی (HT-9711) تولید شرکت هونگتا و ساخت کشور تایوان استفاده شده است. این آزمون در سه نوبت انجام و تکرارپذیری آن تأیید شده است. مشخصات این آزمایش در جدول (۱) درج شده است.

جدول ۱ مشخصات آزمون سنجش استحکام قطعهٔ لاستیکی

دمای آزمایش (^{0}C)	فرکانس (Hz)	دامنه (mm)	پیش بار (dN)
۱۶۵	۱	۱	۱۰

آزمون گرماسنجی. محاسبهٔ گرمای ویژهٔ آمیزه در آزمون کالریمتری ناهم‌دما به‌وسیلهٔ دستگاه (DSC-60) ساخت شرکت Shimadzu ژاپن و برطبق استاندارد ASTM E1269-05 با سرعت گرمادهی ۱۰ ^{0}C/min، در محدودهٔ دمایی ۷۰–۱۸۰^{0}C روی نمونه‌ای به جرم تقریبی ۱۰mg انجام شده است. آزمایش در ٤ نوبت انجام و تکرارپذیری نتایج تأیید شد. مقادیر گرمای ویژه در دماهای مشخص در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲ مقادیر گرمای ویژه در دماهای مختلف

دما (^{0}C)	۱۵۳	۱٦۳	۱۷۳	۱۸۳	۱۹۳
گرمای ویژه (J/kg.K)	۱۲۰۰	۱۱۹۰	۱۱۸۵	۱۱۸۰	۱۱۷۵

آزمون گرانروی سنجی. از سامانهٔ RPA برای تعیین منحنی تغییرات گرانروی لاستیک برحسب سرعت برش استفاده شده است. این آزمایش در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و شرایط فرکانس رفت و برگشتی (Frequency sweep) برطبق استاندارد ASTM D6204 انجام شده است. تکرارپذیری آزمایش نیز مورد تأیید قرار گرفت.

تعیین چگالی و ضریب رسانندگی. لاستیک‌ها تقریباً تراکم‌ناپذیرند و در حل عددی، چگالی آنها معمولاً ثابت فرض می‌شود. براساس مرجع [5] چگالی لاستیک برابر ۱۱۲٥ kg/m^3 در نظر گرفته می‌شود. ضریب رسانش لاستیک‌ها نیز تقریباً یکسان است و براساس مرجع [14] بیان می‌شود.

معادلات حاکم

معادلهٔ سینتیک پخت. پخت یک واکنش پیچیدهٔ شیمیایی است که در طی آن اتصالات عرضی بین زنجیرهای پلیمر به‌وجود می‌آید [15]. درجهٔ پخت نشان‌دهندهٔ مقدار پیشرفت واکنش در هر لحظه است که مقداری بین ۰ و ۱ دارد و با α نشان داده می‌شود. درجهٔ پخت بیان می‌کند که در هر زمان واکنش پخت به چه اندازه کامل شده است. مدل‌های مختلف برای توصیف رفتار پخت ماده ارائه شده‌اند. این مدل‌ها را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم نمود: مدل‌های ساز و کاری [16] و مدل‌های تجربی [6]. مدل‌های ساز و کاری، واکنش‌های شیمیایی را که در طی فرآیند پخت رخ می‌دهد، توصیف و مدل می‌کند. این مدل‌ها توازن گونه‌های شیمیایی درگیر در واکنش را به‌شکل روابط ریاضی که مسیر نرخ واکنش را به زمان پخت و دما مرتبط می‌کند، به‌طور کمی بیان می‌کند. این مدل‌ها دارای معادلات پیچیده‌ای هستند. مدل‌های تجربی شکل ساده‌تری دارند و در مطالعات شبیه‌سازی به‌طور

گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [17]. این مدل‌ها جزئیات شیمیایی سامانه را نادیده می‌گیرند و از روابط تقریبی براساس نوع واکنش به‌کار رفته بهره می‌برند [6]. مدل‌های تجربی زیادی برای بیان رفتار پخت لاستیک ارائه شده‌اند که تنها برخی از آنها برای مدل های سه‌بعدی و ماهیت گذرا بودن فرآیند مناسب می‌باشند [18,19].

در اینجا از مدل کمال و سرور برای محاسبهٔ درجهٔ پخت استفاده شده است [5].

$$\alpha = \frac{k(t-t_i)^n}{1+K(t-t_i)^n} \qquad (۲)$$

در این معادله، n درجه واکنش و t_i زمان القاست. طی این زمان هیچ تغییر شیمیایی در لاستیک رخ نمی‌دهد و تنها لاستیک دستخوش تغییر فیزیکی گرمایش می‌شود. این زمان تابعی از دماست و به‌شکل آرنیوسی بیان می‌شود:

$$t_i = t_0.\exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \qquad (۳)$$

در معادلهٔ (۲)، k ثابت سرعت واکنش است که آن نیز دارای بیان آرنیوسی است:

$$k = k_0\exp(\frac{-E}{RT}) \qquad (٤)$$

که در آن t_0، T_0، k_0 و E خواص سینتیک پخت‌اند که به‌ترتیب ثابت زمانی، ثابت دمایی، ثابت سرعت واکنش و انرژی فعال‌سازی هستند. این ثابت‌ها با استفاده از برازش غیرخطی نتایج رئومتری توسط نرم‌افزار متلب، محاسبه می‌شوند. R ثابت جهانی گازها و T دمای مطلق در هر نقطه است.

به‌علت این‌که فرآیند پخت واکنشی گرمازاست، باید گرمای حاصل از آن به‌عنوان منبع گرمایی در معادلهٔ بقای انرژی در نظر گرفته شود. اگر درجهٔ پخت (α) براساس معادلهٔ (۵) بیان شود، آن‌گاه نرخ تولید حرارت برطبق معادلهٔ (٦) قابل تعریف است [5].

$$\alpha = \frac{Q_t}{Q_\infty} \qquad (۵)$$

$$\dot{Q} = Q_\infty\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) \qquad (٦)$$

که در آن Q_t گرمای آزاد شده تا زمان t و Q_∞ گرمای کل آزاد شدهٔ واکنش است.

فرآیند پخت مواد الاستومری به‌طور عمده یک فرآیند ناهم‌دماست و باید مدل سینیتیک پختی به‌کار رود که هم تأثیر زمانی و هم تأثیر تغییرات دما را روی سرعت و حالت پخت در نظر گیرد. برای دوره القا مدل پیشنهادی پیشین به‌شکل زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [6]:

$$\bar{t} = \int_0^t \frac{dt}{t_i(T)} \qquad (۷)$$

در این رابطه t_i (T)، وابستگی زمان القا به دما است که با معادلهٔ (۳) بیان می‌شود. زمانی که این زمان بی‌بعد مساوی ۱ شود، پخت لاستیک شروع می‌شود.

معادلات بقا. معادلات حاکم بر حل این مسأله عبارتند از: بقای جرم، اندازهٔ حرکت، کسر حجمی و انرژی. به‌دلیل رفتار غیر نیوتنی لاستیک از مدل لزجت غیرنیوتنی- توانی برای محاسبهٔ تنش برشی در معادلهٔ بقای اندازهٔ حرکت استفاده می‌شود. این مدل که جواب‌های مناسبی برای سیالات پلیمری ارائه می‌دهد [20,21]، به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

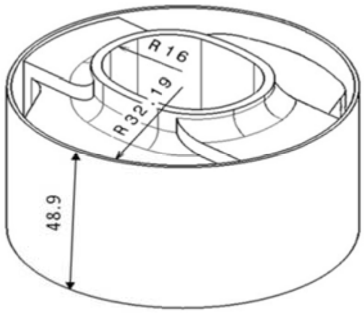
$$\boldsymbol{\mu = A(\dot{\gamma})^{B-1}\exp(\frac{T_0}{T})} \qquad (۸)$$

که در آن، A شاخص تغییرشکل پذیری سیال غیرنیوتنی است و مقدار میانگین لزجت را نشان می‌دهد. B مقدار انحراف از رفتار نیوتنی سیال، $\dot{\gamma}$ سرعت برش و T_0 دمای مرجع (معمولاً دمای آزمایش) است. ضرایب n و k با استفاده از برازش منحنی تغییرات لزجت- سرعت برش محاسبه می‌شود. با معلوم بودن این مقادیر، لزجت لاستیک در هر دما و نرخ برش قابل محاسبه خواهد بود.

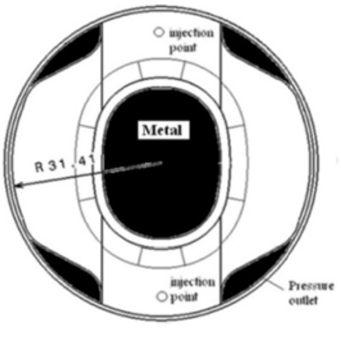
مدل عددی

مدل هندسی و شبکه‌بندی دامنهٔ حل. قطعهٔ مورد نظر که یافتن زمان پخت آن مورد نظر است، ضربه‌گیر خودروست که هندسه و ابعاد آن به میلی‌متر در شکل (۲) ارائه گردیده است. حجم داخلی که در شکل نیز مشخص گردیده است، فلز و سایر قسمت‌ها لاستیک است. در شکل (۳) شبکه‌بندی محیط حل نشان داده شده است. شبکهٔ مورد نظر به اندازهٔ کافی ظریف (۷٦۷۳٤۵ المان هرمی) انتخاب گردیده است؛ به‌طوری که حل عددی از تعداد نقاط شبکه مستقل می‌باشد.

شرایط مرزی. لاستیک مذاب در ورود به قالب (نقطهٔ تزریق در شکل (۲- ب) دارای شرط فشار ورودی با دمای مشخص است. در واقعیت در هنگام پر شدن قالب هوای موجود از منفذهای موجود در قالب خارج می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از محبوس ماندن هوا، در حل عددی نوار بالایی قالب به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شده است تا هوای موجود به خارج هدایت گردد (شکل ۲-ب). تمامی دیواره‌های قالب دارای شرط مرزی دما ثابت می‌باشند. فرض عدم لغزش در مجاورت دیوار نیز برقرار است. پارامترهای اصلی فرآیند قالب‌گیری براساس داده‌های ثبت شده ماشین تزریق در جدول (۳) ارائه گردیده است.

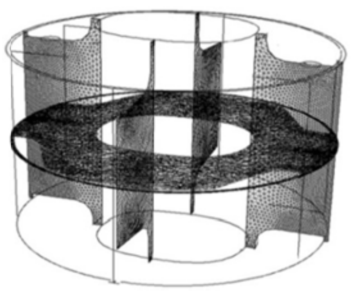


(الف)



(ب)

شکل ۲ قطعه لاستیکی (ابعاد به میلی‌متر) الف. نمای ایزومتریک، ب. نمای بالا (قسمت‌های سیاه‌رنگ نمایانگر فلز هستند)



شکل ۳ نمایش شبکه‌بندی قطعهٔ لاستیکی بر روی صفحات تقارن آن

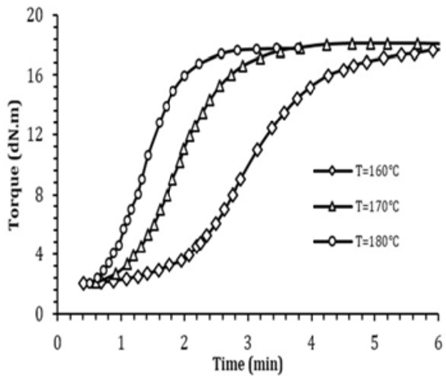
جدول ۳ مشخصات اصلی فرآیند قالب‌گیری تزریقی براساس داده‌های ثبت شدهٔ ماشین تزریق

دمای قالب (^0C)	دمای تزریق (^0C)	فشار تزریق (kg/cm^2)	زمان تزریق (s)
۱۷۵	٦۵	۹۰	۲۵±۱

نتایج و بحث

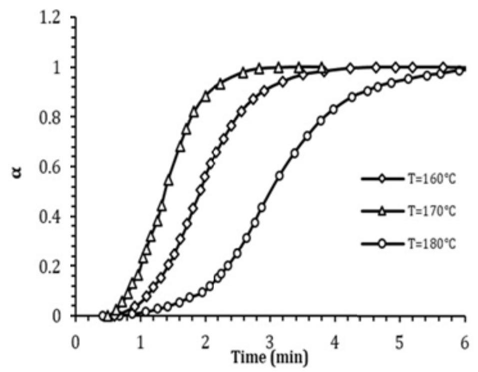
در این مقاله به‌کمک روش حـل عـددی، شـبیه‌سـازی رایانه‌ای فرآیند پخت در تولید یک قطعهٔ صنعتی که بـه شیوهٔ قالب‌گیری تزریقی تولید شده است، ارائه گردیده است. برای این منظور یـک برنامـهٔ کمکـی کـه شـامل معادلات سینتیک پخت لاستیک می‌باشد، به نـرم‌افـزار فلوئنت افزوده می‌شود و با حل هم‌زمان این معـادلات و معـادلات بقـا، فرآینـد پخـت لاسـتیک شـبیه‌سـازی می‌شود و زمان پایان پخت پیشگویی می‌گردد.

شکل (٤) منحنی تغییرات گشتاور نسبت به زمـان (منحنی رئومتری) نمونهٔ آزمایشـگاهی آمیـزهٔ لاسـتیک مورد استفاده در قطعهٔ مورد نظر را در دماهای مختلـف آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده مـی‌شـود، در هر سه دما مقدار گشتاور با گذشـت زمـان افـزایش می‌یابد؛ زیرا با افـزایش زمـان و آغـاز واکـنش پخـت، اتصالات عرضی در ساختار پلیمر بـه‌وجـود مـی‌آیـد و سبب افزایش لزجت آمیزه می‌گـردد. بنـابراین گشـتاور عکس‌العملی ناشی از نوسان نمونـه افـزایش مـی‌یابـد. به‌کمک معادلـهٔ (۱) مـی‌تـوان منحنـی رئـومتری را بـه منحنی درجهٔ پخت-زمان تبدیل نمود.



شکل ٤ منحنی گشتاور زمان برای نمونهٔ آزمایشگاهی آمیزهٔ مورد استفاده در قطعهٔ لاستیکی در دماهای متفاوت

شکل (۵) تغییـرات درجـهٔ پخـت-زمـان را بـرای دماهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طـور کـه مشـاهده می‌شود، بـا افـزایش دمـا و بـه‌دلیـل افـزایش سـرعت واکنش، اتصالات پلیمری سریع‌تر شکل می‌گیـرد و در نتیجه آمیزه در زمان کمتـری بـه پخـت ($\alpha \cong 1$) دسـت پیدا می‌کند. هرچه دمـای واکـنش پخـت بیشـتر شـده است، شیب منحنـی پخـت نیـز افـزایش یافتـه اسـت. به‌منظور محاسبهٔ درجه و ثابت سرعت واکنش پخت در معادلهٔ (۲)، معادلهٔ سینیتیکی پخت بر روی منحنی‌هـای شکل (۵) برازش شده است. مقادیر t_0 و T_0 نیز به‌طـور مستقیم از داده‌های رئـومتری و ثابـت‌هـای k_0 و E بـا استفاده از منحنی تغییرات Ln(k) برحسب معکوس دما (K) محاسبه می‌شوند. پارامترهـای سـینیتیک پخـت در جدول (٤) ارائه شده‌اند.



شکل ۵ منحنی درجهٔ پخت برحسب زمان برای نمونهٔ آزمایشگاهی آمیزهٔ مورد استفاده در قطعهٔ لاستیکی در دماهای متفاوت

جدول ٤ خواص سینتیک پخت لاستیک براساس مدل کمال – سرور [۲۰]

K_0	n	E	t_0	T_0
$۱/۳۷\times۱۰^{۳۲}$	٤/۹۵۷	۳۵۸۸۳۲	$۲/۸۰\times۱۰^{-۱۱}$	۱۲٦۹۰

هم‌چنین با دقت در نتـایج آزمایشـگاهی مشـاهده می‌شود که ثابت درجهٔ واکنش پخت (n) در هر دمـایی مقدار متفاوتی دارد. در فرآینـد پخـت قطعـات ضـخیم (بیشتر از ۵ میلی‌متر) به‌سبب ضریب رسـانش حـرارت پایین لاستیک (W/m.K ٠/٤-٠/٢)، اختلاف دمای قابل

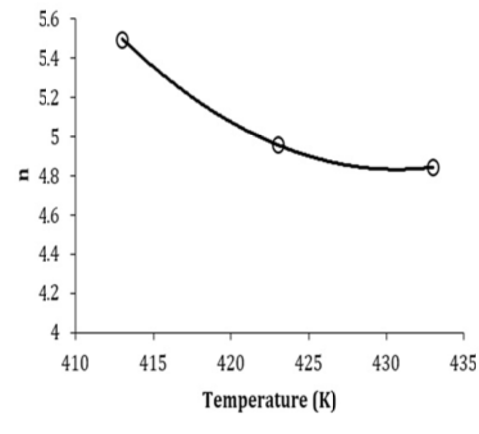
تـوجهی بـین نـواحی قطعـهٔ لاسـتیکی وجـود دارد و بنابراین هر نقطه از آن درجهٔ واکـنش متفـاوتی دارد. از آن‌جایی که پخت این قطعات در یک محـدودهٔ دمـایی متفاوت اتفاق می‌افتد، لازم است تا مدل پختی توسـعه داده شود که توانایی محاسبه n در هر دما را دارا باشـد. در این قسمت مدل کمال-سرور، بـا اسـتفاده از رسـم منحنی تغییرات درجهٔ واکنش برحسب دمـای آزمـایش که در شکل (٦) نشـان داده شـده اسـت و بـا در نظـر گرفتن یک تابع دو جمله‌ای برای n تصحیح شده است. بنابراین مدل سینیتیک پخت کمال-سرور در یک دمای ثابت به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\alpha = \frac{kt^{aT^2+bT+c}}{1+kt^{aT^2+bT+c}} \quad (٩)$$

در رابطهٔ بالا، ضرایب a، b و c ثابت‌هـای منحنـی درجهٔ واکنش هستند و با اسـتفاده از بـرازش منحنـی و تغییرات درجهٔ واکنش برحسب دما محاسبه مـی‌شـوند. این ضرایب در جدول (٥) درج شده‌اند.

جدول ٥ ضرایب معادلهٔ درجه ٢ درجهٔ واکنش سینیتیک پخت

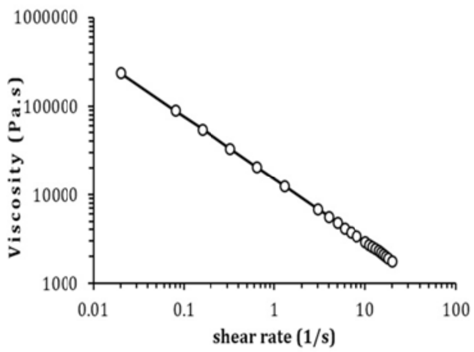
a	b	c
۰/۰۰۲۱۲	-۱/۸۳۰٤	۳/۹۸۹۹



شکل ٦ منحنی تغییرات درجهٔ واکنش پخت برحسب دما

اکنون با مشخص شدن تمامی پارامترهای معادلات سینیتیک پخت، امکان محاسبهٔ درجهٔ پخت در هر زمان با استفاده از هر دو مدل عادی کمال-سرور و تصـحیح یافته وجود دارد.

برای مرحلهٔ تزریق نیز باید لزجت لاستیک مـذاب که یک سیال غیرنیوتنی است، محاسبه شود. همان‌طـور که پیش‌تر گفته شد، از آزمـون گرانـروی‌سـنجی بـرای محاسبهٔ تغییرات لزجت لاستیک مـذاب اسـتفاده شـده اسـت. بـا داشـتن منحنـی تغییـرات لزجـت لاسـتیک برحسب نرخ برش که در شـکل (٧) نشـان داده شـده است، ثابت‌های مدل لزجـت در معادلـهٔ (٨) بـه‌کمـک برازش منحنی محاسبه می‌شود. لازم به ذکـر اسـت کـه داده‌های تجربی لزجت در دمای ۱۲۰ ^{0}C ثبت شده‌انـد. در جدول (٦) ثابت‌های مدل لزجت درج شده‌اند.



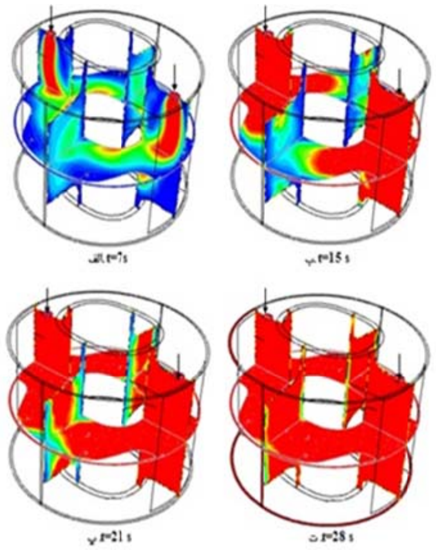
شکل ٧ منحنی تغییرات لزجت لاستیک مذاب برحسب نرخ برش در دمای ۱۲۰ 0C با استفاده از آزمون گرانروی سنجی

جدول ٦ ثابت‌های مدل لزجت در دمای ۱۲۰ ^{0}C

A	B	T0
۵۵۰۳	۰/۲۹۲۹	۳۹۳

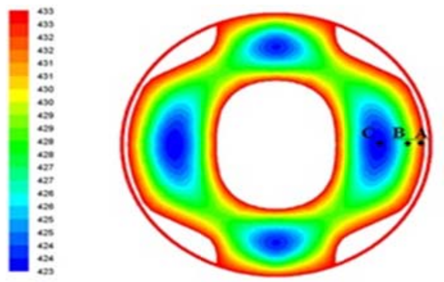
در شکل (٨) نحوهٔ پر شدن قالب توسـط لاسـتیک در زمان‌های مختلف از شروع فرآیند تزریق نشـان داده شده است. در ایـن شـکل کسـر حجمـی لاسـتیک در زمان‌های مختلف از شروع تزریق بر روی صفحه‌هـای تقارن مدل نشان داده شده است. براسـاس مشخصـات ماشین تزریق زمان در جدول (٣) زمـان لازم بـرای پـر

شدن فضای قالب ۱±۲۵ ثانیه است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، حل عددی با دقت مناسبی این زمان را ۲۸ ثانیه پیش‌گویی کرده است.



شکل ۸ نحوهٔ پر شدن قالب توسط فاز لاستیک

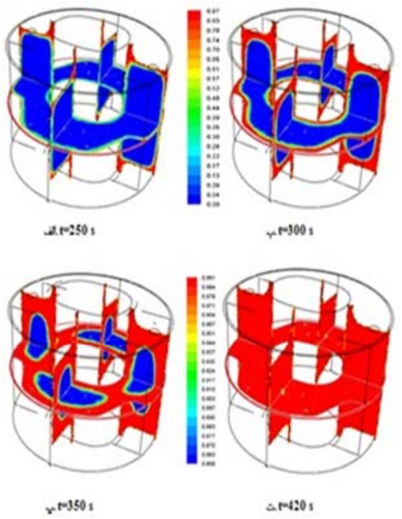
پس از پر شدن کامل قالب، با جایگزین کردن شرط مرزی دیواره به‌جای ورودی فشار، دبی ورودی جریان صفر می‌شود و آمیزه در اثر نفوذ حرارت از دیوارهٔ قالب به سمت داخل پخت می‌شود. در شکل (۹) توزیع پیوستهٔ میدان دما پس از گذشت ۲۵۰ ثانیه از شروع فرآیند بر روی صفحهٔ تقارن ضربه‌گیر (در راستای محور آن) ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف دمای زیادی بین بخش‌های مختلف ضربه‌گیر یعنی بین نقاط نزدیک به قالب و نقاط دور از آن به‌دلیل ضریب رسانش پایین لاستیک وجود دارد. چهار ناحیه در شکل با رنگ تیره مشخص است که با گذشت زمانی در حدود ۲۵۰ ثانیه از شروع گرما دادن، هنوز به دمای نهایی قالب نرسیده‌اند. سه نقطهٔ متفاوت A، B و C در این شکل مشخص شده‌اند که موقعیت مختلفی نسبت به سطح قالب دارند. نقطه A نزدیک‌ترین و نقطهٔ C دورترین نقطه به سطح قالب است. مشخص است که هر نقطهٔ ضربه‌گیر تاریخچهٔ دمایی متفاوتی دارد. این اختلاف دما که مخصوصاً در قطعات ضخیم قابل‌توجه است، سبب می‌گردد که هر ناحیه از ضربه‌گیر و در هر زمان از فرآیند، درجهٔ پخت متفاوتی داشته باشد. بنابراین نواحی لاستیک، مقادیر متفاوتی از درجهٔ واکنش (n) را تا انتهای فرآیند تجربه می‌کنند. لذا استفاده از مدل سینتیک پختی که توانایی محاسبهٔ مقادیر مختلف درجهٔ واکنش را برحسب زمان داشته باشد، ضروری است.



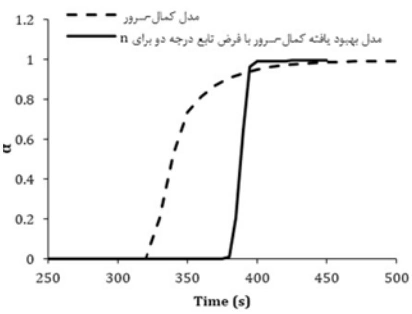
شکل ۹ توزیع پیوستهٔ دما روی صفحهٔ تقارن قطعهٔ لاستیکی در زمان t=250 s

در شکل (۱۰) توزیع پیوستهٔ درجهٔ پخت با استفاده از مدل پخت کمال-سرور تصحیح شده (معادلهٔ ۹) بر روی صفحه‌های تقارن ضربه‌گیر و در زمان‌های گوناگون از ابتدای فرآیند ولکانش ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در زمان t=۲۵۰s واکنش پخت از لبه‌ها و نواحی نزدیک به قالب شروع گردیده است. از دیدگاه فیزیکی دمای این نقاط به‌دلیل مجاورت به قالب زودتر از سایر نقاط افزایش می‌یابد و سبب می‌شود که زودتر به پخت برسد. از نظر تئوری و طبق معادلهٔ (۷)، افزایش دما سبب می‌گردد که انتگرال محاسبه شده (دورهٔ القا) در زمان کمتری به یک برسد و در نتیجه واکنش پخت زودتر شروع شود. در زمان t=۳۵۰s نقاط نزدیک به قالب کاملاً پخت شده‌اند؛ در حالی که درجهٔ پخت نقاط میانی ضربه‌گیر صفر است. همان‌طور که قبلاً بیان شد علت این رفتار در پایین بودن ضریب رسانش حرارتی لاستیک می‌باشد. در

شکل (۱۱) منحنی درجهٔ پخت-زمان قطعهٔ لاستیکی با استفاده از دو مدل کمال -سرور عادی و تصحیح شده در این مقاله، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان پخت (معادل درجهٔ پخت ۰/۹۹) در مدل معمولی کمال- سرور در حدود t=٤٧٠s و در مدل تصحیح یافته در حدود t=٤٠٠s می‌باشد.



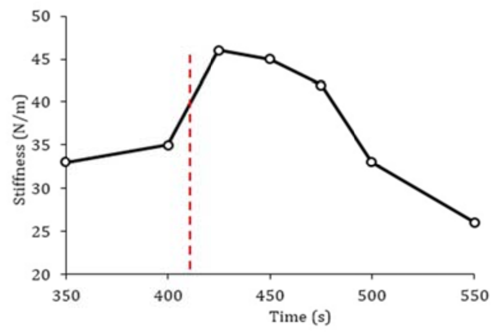
شکل ۱۰ توزیع پیوستهٔ میدان پخت قطعهٔ لاستیکی در زمان‌های مختلف، در مدل معمولی کمال- سرور در حدود t=450 s و در مدل تصحیح یافته در حدود t=420 s می‌باشد.



شکل ۱۱ مقایسهٔ منحنی درجهٔ پخت – زمان برای دو مدل عادی و تصحیح یافتهٔ کمال – سرور

همان‌طور که قبلاً بیان شد، آزمون استحکام به‌منظور یافتن زمان پخت بهینه برای قطعات پیچیده انجام می‌گردد؛ بدین صورت که در زمان‌های مختلف از فرآیند ولکانش، قطعه از قالب خارج و میزان استحکام آن سنجیده می‌گردد. نتایج آزمایش استحکام برای ضربه‌گیر در زمان‌های مختلف پخت در شکل (۱۲) ارائه شده است. از آنجا که در بهترین زمان پخت، قطعه بالاترین خواص مکانیکی از جمله استحکام را دارا است [3]، لذا هر زمان از فرآیند که قطعه بالاترین استحکام را داشته باشد به‌عنوان زمان پخت بهینه شناخته می‌شود. بنابراین در شکل (۱۲)، ضربه‌گیر در زمان t=٤٢٧ s دارای بیشترین استحکام می‌باشد و این زمان به‌عنوان زمان پایان پخت بهینهٔ آزمایشگاهی شناخته می‌گردد. لازم به ذکر است که ضریب رسانش لاستیک در حین فرآیند پخت به‌طور خطی با دما کاهش می‌یابد [5]. در این پژوهش ضریب رسانش لاستیک قبل از واکنش پخت و دارای مقدار ثابت در کل فرآیند فرض شده است که این فرض موجب می‌گردد نواحی میانی لاستیک (نقطهٔ C در شکل ۹) زودتر به دمای نهایی خود دست می‌یابد و زمان پخت، اندکی زودتر از معمول گزارش گردد.

بنابراین مشاهده می‌شود که مدل سینتیک پخت تصحیح شده در این پژوهش به‌دلیل در نظر گرفتن یک تابع درجهٔ دوم برای تغییرات درجهٔ واکنش پخت نسبت به دما، با دقت بیشتری زمان پایان پخت قطعهٔ لاستیکی سه‌بعدی را پیش‌بینی کرده است. بنابراین می‌توان زمان پایان پخت را در قطعات پیچیدهٔ لاستیکی که در فرآیند قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شوند، بدون نیاز به آزمون‌های سعی و خطا که منجر به افزایش ضایعات و هزینه‌های تولید می‌گردند، محاسبه نمود.



شکل ۱۲ منحنی تغییرات استحکام قطعهٔ لاستیکی در زمان‌های مختلف از شروع فرآیند ولکانش

نتیجه‌گیری

در ایــن پــژوهش فرآینــد ولکــانش لاســتیک در تولیــد قطعات لاستیکی به روش قالب‌گیری تزریقی با هــدف محاسبهٔ زمان پخت مورد مطالعــهٔ عــددی قــرار گرفتــه است. به‌منظــور محاســبهٔ خــواص ســینتیک پخــت، از داده‌های آزمایش رئــومتری کــه بــه پخــت یــک نمونــهٔ آزمایشــگاهی مــی‌پــردازد، اســتفاده شــده اســت. بــرای محاســـبهٔ پارامترهـــای مـــدل لزجـــت، از آزمـــایش گرانروی‌سنجی و بــرای تعیــین ظرفیــت گرمــای ویــژهٔ لاستیک از آزمــایش گرماســنجی اســتفاده شــده اســت. هم‌چنین مدل سینیتیک پخت لاستیک به‌منظور افــزایش دقت، اصلاح شده اســت. مشــخص گردیــد کــه مــدل اصلاح شده با فرض یک تابع درجــه دو بــرای درجــهٔ واکنش پخــت، بــا دقــت بــالاتری زمــان پخــت قطعــهٔ لاستیکی را پیش‌بینی کرده است.

فهرست علائم

A شاخص تغییرشکل‌پذیری در مدل لزجت

B مقدار انحراف از رفتار نیوتنی در مدل لزجت

C_P گرمای ویژه ($JKg^{-1}K^{-1}$)

E انرژی فعال‌سازی واکنش پخت ($Jg^{-1}mol^{-1}$)

k سرعت معادلهٔ پخت

k_0 ثابت سرعت معادلهٔ پخت

Q_t گرمای آزاد شده واکنش پخت تا زمان t (J)

Q_∞ کل گرمای آزاد شدهٔ واکنش پخت (J)

Q° سرعت تولید حرارت (W)

R ثابت جهانی گازها ($Jmol^{-1}K^{-1}$)

t زمان (s)

t_i دورهٔ القا

t_0 ثابت زمانی در معادلهٔ دورهٔ القا

T دما (K)

T_0 ثابت دمایی در معادلهٔ دورهٔ القا

n درجهٔ واکنش پخت

علایم یونانی

α درجهٔ پخت

γ_0 گشتاور در شروع واکنش پخت (dN.m)

γ_t گشتاور در زمان t (dN.m)

γ_∞ گشتاور در انتهای واکنش پخت (dN.m)

تقدیر و تشکر

از همکاری صمیمانهٔ گروه صــنعتی پــارت لاســتیک در ارائهٔ نتــایج آزمایشــگاهی تقــدیر و تشــکر مــی‌گــردد.

مراجع

1. Vergnad, J.M. and Rosca, I.D., "*Rubber Curing and Properties"*, CRC Press, Taylor-Francis Group. New York pp. 1-11, (2009).
2. Holm, E.J. and Langtangen, H.P., "A Unified Finite Element Model For The Injection Molding Process", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 178, pp. 413-429, (1999).
3. Ramorino, G., Girardi, M., Agnelli, S. and Franceschini, A., "Injection Molding of Engineering Rubber Components: A Comparison Between Experimental Results and Numerical Simulation", *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, pp. 551-554, (2010).
4. Zhang, P., Zhao, F., Yaun, Y., Shi, X. and Zhao, S., "Network Evolution Based on General-Purpose Diene Rubbers/Sulfur/TBBS System During Vulcanization (I)", *Polymer*, Vol. 51, pp. 257-263, (2010).
5. Ghoreishy, M.H.R. and Naderi, G., "Three Dimensional Finite Element Modeling of Rubber Curing Process", *Journal of Elastomers and Plastics*, Vol. 37, pp. 37-53, (2005).

6. Arrillaga, A., Zaldua, A. M.R., Atxurra, M. and Farid, A.S., "Techniques Used For Determining Cure Kinetics of Rubber Compounds", *European Polymer Journal*, Vol. 43, pp. 4783-4799, (2007).
7. M. Rafei, M.H.R. Ghoreishy, Naderi, G., "Developments of An Advanced Computer Simulation Technique for the Modeling of Rubber Curing Process", *Computational Materials Science*, Vol. 47, pp. 539-547, (2009).
8. Abhilash, P.M., Kannan, K. and Varkey, B., "Simulation of Curing of a Slab Rubber", *Materials Science and Engineering*, Vol. 168, pp. 237-241, (2010).
9. Ghosh P., Katare, S. and Caruthers, J.M., "Sulfur Vulcanization of Natural Rubber for Benzothiazole Accelerated", Rubber Chemistry and technology, Vol. 76, pp. 592-693, (2003).
10. Khor, C., Ariff, Y. Z. M., Ani, F. C., Mujeebu, M., Abdullah, M. K. and Joseph, M. A., "Three-Dimensional Numerical and Experimental Investigations on Polymer Rheology In Meso-Scale Injection Molding", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 131-139, (2010).
11. Leroy, E., Souid, A. and Deterre, R., "A continuous kinetic model of rubber vulcanization predicting induction and reversion", *Polymer Testing,* Vol. 32, pp. 575-582, (2013).
12. Hosseini, M. and Razzaghi, M., "Vulcanization kinetics of nano-silica filled styrene butadiene rubber", *Polymer,* Vol. 55, pp. 6426-6434, (2014).
13. Dongcheol, C., Abdul Kader, M., Baik-Hwan, C., Yang, I. and Changwoon, N., "Vulcanization kinetics of nitrile rubber/layered clay nanocomposites", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 98, pp. 1688-1696, (2005).
14. Javadi, M., Moghiman, M., Erfanian, M.R. and Hosseini, N., "Numerical Investigation of Curing Process in Reaction Injection Molding of Rubber For Quality Improvements", *Key Engineering Materials*, Vol. 462, pp. 1206-1211, (2011).
15. Bianchi, O., Fiorio, R., Martins, J.N., Zattera, A.J. and Scuracchio, C.H., "Crosslinking Kinetics of Blends of Ethylene Vinyl Acetate and Ground Tire Rubber", *Journal of Elastomers and Plastics,* Vol. 41, pp. 175-189, (2009).
16. Fan, R.L., Zhang, Y., Huang, C. and Gong, P., “Simulation and Verification For Sulphur Accelerated Vulcanization of Gum Natural Rubber Compound”, *Rubber Chemistry and technology*, Vol. 75, pp. 287-295, (2002).
17. Ghoreishy, M. H. R., Rafei, M., Naderi, G., Bakhshandeh, G. R. and Nasiri, M., "Computer Simulation of Cure Process of an Axisymmetric Rubber Article Reinforced by Metal Plates Using Extended ABAQUS Code", *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 23, pp. 121-131, (2010).
18. Isayev, AI. and Deng, J. S., "Non Isothermal Vulcanization of Rubber Compounds", *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 61, pp. 340-361, (1988).
19. Tong, J. and Yan, X., "Non Isothermal vulcanization of rubber compounds", *Journal of Reinforced Plastic and Composites* , Vol. 22, pp. 983-1002, (2003).
20. Kamal, M. and Sourour, S., "Kinetics and Thermal Characterization of Thermoset cure", *Polymer Engineering and Science,* Vol. 13, pp. 590-599, (1973).
21. Del Coz, J. J., Diaz Garcia Nieto, P. J. and Bello Garcia, Guerrero Munoz, A., J., "Finite Volume Modeling of The Non-Isothermal Flow of a Non-Newtonian Fluid in a Rubber’s Extrusion Die", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 354, pp. 5334-5336, (2008).